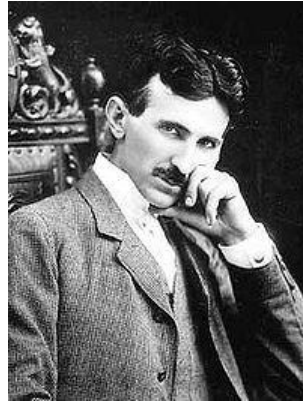
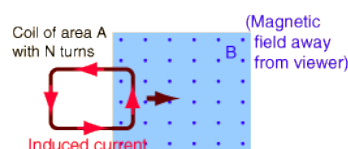


Aula 24 - Aplicações da Lei de Faraday



Nikola Tesla (*10/07/1856, Smiljan, Croácia; + 07/01/1943, New York, USA): estudou na escola politécnica de Graz (Áustria) e começou a trabalhar em telegrafia ainda na Europa, período no qual criou diversas invenções importantes no ramo da eletricidade e magnetismo, entre as quais o motor de indução. Emigrou para os Estados Unidos em 1884 onde foi trabalhar na indústria de Thomas Edison. Após ter pedido demissão, criou a própria empresa em 1886, onde continuou o desenvolvimento da tecnologia de correntes alternadas, em oposição à Edison, que propunha o uso de correntes contínuas. Além disso inventou a bobina de Tesla, destinada a produzir grandes tensões, e que foi amplamente usada na época da descoberta dos raios-X por Roentgen (após 1892). Nessa mesma época ele defendeu a transmissão de energia elétrica usando ondas eletromagnéticas no lugar de fios, uma tecnologia que foi abandonada pela sua inviabilidade econômica e ambiental. Em sua homenagem, a unidade de campo magnético no sistema internacional foi batizada de Tesla.

Recordação: Lei de Faraday: um fluxo magnético variando com o tempo provoca uma fem induzida. Lei de Lenz: o sentido da corrente induzida tende a se opor a causa que a produziu.



A coil of wire moving into a magnetic field is one example of an emf generated according to Faraday's Law. The current induced will create a magnetic field which opposes the buildup of magnetic field in the coil.

Faraday's Law

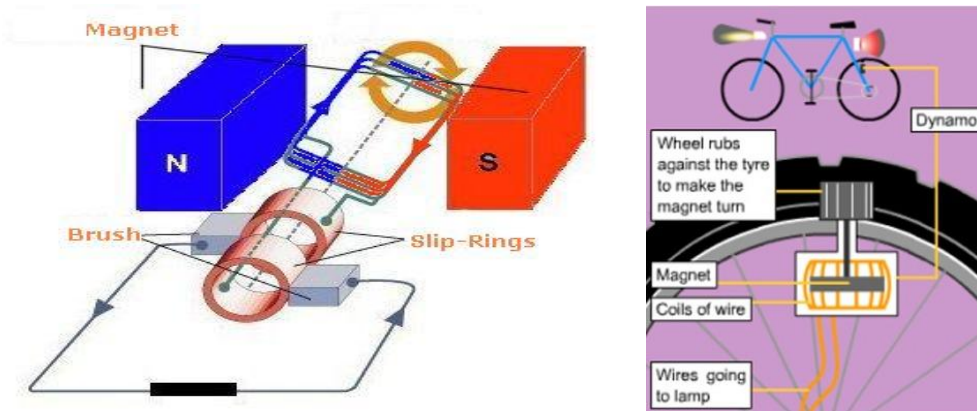
$$\text{Emf} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Lenz's Law

where N = number of turns
 $\Phi = BA$ = magnetic flux
 B = external magnetic field
 A = area of coil

The minus sign denotes Lenz's Law.
Emf is the term for generated or induced voltage.

1. **Gerador de corrente alternada:** consiste essencialmente numa bobina girando num campo magnético exterior produzido por um ímã permanente. Como a área efetiva da bobina varia com o tempo, também o fluxo magnético varia, provocando uma fem induzida. Num dínamo de bicicleta, o movimento provém das pedaladas do ciclista.



Seja uma bobina retangular de lados L e w , e com N espiras, girando em torno do seu eixo de rotação com velocidade angular constante ω . Das equações do movimento circular uniforme, temos que o ângulo entre o plano da espira e a direção do campo magnético é $\theta = \omega t$. O ângulo θ varia com o tempo, e assim também o vetor área da espira, que é sempre perpendicular a ela. Logo, o fluxo magnético é

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} = BA \cos \theta = BA \cos(\omega t)$$

onde $A = L w$ é a área da bobina.

Pela lei de Faraday (na forma diferencial), a fem induzida na bobina será

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\varepsilon(t) = -N BA \frac{d \cos(\omega t)}{dt} = -N BA (-\omega) \sin(\omega t) = N BA \omega \sin(\omega t)$$

que é uma fem, ou tensão, alternada pois varia senoidalmente com o tempo, com uma frequência angular (medida em radianos por segundo) $\omega = 2\pi f$, onde f é a frequência “comum” (inverso do período, medido em ciclos por segundo ou Hertz). O valor máximo da fem alternada é a sua amplitude, denotada

$$\varepsilon_m = NBA\omega = NBA 2\pi f$$

tal que

$$\boxed{\varepsilon(t) = \varepsilon_m \text{sen } \omega t}$$

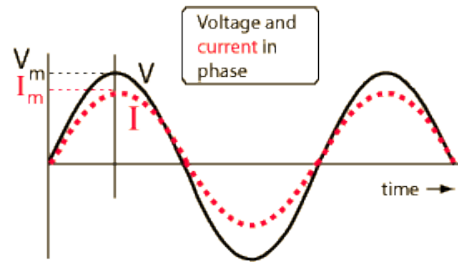
Na rede elétrica doméstica no Brasil, temos que $f = 60$ Hz, de modo que a frequência angular é $\omega = 2\pi \times 60 = 377$ rad/s. Se ligarmos um gerador de tensão alternada a um resistor R , aparecerá uma corrente alternada

$$i(t) = \varepsilon(t)/R = (N BA \omega/R) \text{sen}(\omega t)$$

com a mesma frequência que a tensão alternada e valor máximo $I = (N BA \omega/R)$, ou

$$\boxed{i(t) = I \text{sen } \omega t}$$

Além disso, a tensão e a corrente estão em fase (o máximo de uma coincide com o máximo da outra, etc.)



Como a frequência de 60 Hz é muito grande (a tensão oscila 60 vezes em cada segundo!) na prática não conseguimos medir precisamente o valor instantâneo da fem alternada, mas sim o seu valor eficaz, que é a média quadrática, dada por

$$\epsilon_{RMS} = \frac{\epsilon_m}{\sqrt{2}}$$

onde o sufixo RMS vem do inglês “root mean square” (média quadrática). Na rede elétrica doméstica do estado do Paraná o valor eficaz da fem é 110 V. Logo, o valor máximo da fem é $\epsilon_m = \epsilon_{RMS} \sqrt{2} = 110 \times \sqrt{2} \approx 155 \text{ V}$.

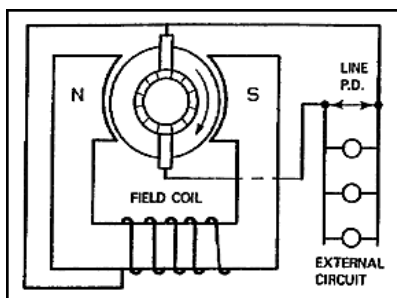
Problema resolvido: Projete um gerador de corrente alternada que forneça a mesma tensão da rede elétrica doméstica, usando uma bobina quadrada num campo magnético uniforme de 0,4 T.

Solução: O valor máximo da fem é

$$\epsilon_m = NA (2 \pi f B) = NA(2 \pi \times 60 \times 0,4) = 155,6$$

Logo $NA = 155,6/150,8 = 1,03 \text{ espiras.m}^2$. Se usarmos espiras quadradas de lado $L = 30 \text{ cm}$, então $A = 0,3 \times 0,3 = 0,09 \text{ m}^2$ e precisaremos de uma bobina com $N = 1,03/0,09 \approx 12 \text{ espiras}$ (há infinitas respostas, obviamente, mas se N for grande demais pode ser inviável o projeto).

Problema proposto: Uma bobina tem 250 espiras e área de 3 cm quadrados. A bobina gira num campo magnético de 0,4 T, a 60 Hz. Ache os valores: (a) máximo e (b) eficaz da fem produzida; (c) a frequência angular; (d) o período. Respostas: (a) 11,3 V; (b) 8,0 V; (c) 377 rad/s; (d) 0,02 s.



Os geradores síncronos empregam eletroímãs ao invés de ímãs permanentes. As espiras do eletroímã são alimentadas pela fem induzida pela própria ação do gerador. A espira girante é chamada de "rotor", e o campo magnético é produzido por um eletroímã chamado "estator". O gerador é dito síncrono pois a tensão alternada tem a mesma frequência que o giro do rotor. A bobina girante (rotor) está em paralelo com a bobina do eletroímã (estator). Esse tipo de geradores é usado em usinas hidroelétricas (onde a energia cinética para girar o rotor vem da transformação da energia potencial gravitacional proveniente de uma queda d'água) e termoelétricas (onde o rotor é ligado a uma turbina movimentada por vapor d'água produzido pela combustão).

Problema resolvido: Num gerador síncrono o estator e o rotor têm resistências elétricas iguais a $r_S = 100 \Omega$ e $r_R = 0,060 \Omega$, respectivamente. O gerador é projetado para fornecer $P = 40 \text{ kW}$ de potência útil a uma tensão eficaz de $V = 250 \text{ V}$. Calcule: (a) a corrente eficaz fornecida; (b) a corrente no estator; (c) a corrente no rotor; (d) a fem total induzida; (e) a potência elétrica no rotor.

Solução: (a) no circuito externo, ao qual está ligado o gerador, a potência é $P = V i_{ext}$,
 $i_{ext} = P/V = 40000/250 = 160 \text{ A}$ (sempre valores eficazes);

(b) como o rotor está em paralelo com o estator, ambos estão sob a mesma ddp, $V = V_S$, que no caso é a tensão eficaz de 250 V . Logo a corrente no estator é

$$i_S = V_S/r_S = 250/100 = 2,5 \text{ A}$$

(c) a corrente no rotor é dividida parte para o circuito exterior, e parte para o estator:

$$i_R = i_{ext} + i_S = 160 + 2,5 = 162,5 \text{ A}$$

(d) a fem total induzida é a fem fornecida mais a queda de tensão provocada no rotor.

$$\varepsilon_T = V + r_R i_R = 250 + 0,060 \times 162,5 = 260 \text{ V}$$

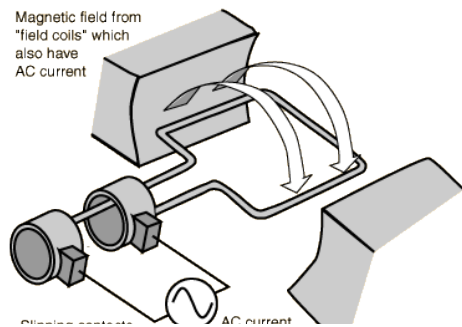
(e) a potência no rotor é

$$P = \varepsilon_T i_R = 260 \times 162,5 = 42 \text{ kW}$$

Observe que a diferença $42 \text{ kW} - 40 \text{ kW} = 2 \text{ kW}$ com a potência útil é devida a potência dissipada nas resistências tanto do rotor como do estator.

Problema proposto: A tensão induzida no estator de um gerador síncrono é de 596 V . As resistências do rotor e do estator são iguais a $0,100 \Omega$ e 110Ω , respectivamente. Se a corrente no rotor é de 460 A , calcule: (a) a fem gerada, (b) a corrente no estator, (c) a corrente e (d) a potência úteis fornecidas ao circuito externo. Respostas: (a) 550 V , (b) 5 A , (c) 455 A , (d) 250 kW .

2. Motor de corrente alternada (CA): convertem energia elétrica em energia mecânica, no processo inverso ao do gerador CA, pois a mesma bobina que gira num campo magnético pode ser usada como um motor de corrente alternada. Injetamos uma corrente elétrica alternada na bobina (denominada rotor). Vimos que uma espira num campo magnético sofre um torque, o qual provoca então a rotação da espira. Nos motores síncronos o campo magnético é produzido por eletroímãs (estatores), alimentados pela corrente elétrica da rede.



Força contraeletromotriz: devido à rotação da bobina (rotor) aparecerá uma fem induzida, chamada força contra-eletromotriz (f_{cem}), pois ela tende a se opor à fem alternada que produziu a corrente elétrica. Esse efeito também aparece nos motores a corrente contínua (CC).

Problema resolvido: O enrolamento de um motor CA tem resistência de $1,5 \Omega$. Quando o motor está ligado a uma fonte de 40 V a corrente no rotor é $2,0 \text{ A}$ (todos valores eficazes). Qual a força contra-eletromotriz?

Solução: Se o motor "puxa" $2,0 \text{ A}$, a queda de tensão no enrolamento do rotor é simplesmente $V = i R = 2,0 \times 1,5 = 3 \text{ V}$. Como o motor "puxa" 40 V da fonte de fem, a força contra-eletromotriz será $\varepsilon' = 40 - 3 = 37 \text{ V}$.

Problema proposto: Suponha que no problema anterior o motor esteja girando à sua velocidade máxima. Qual a corrente inicial no rotor quando ligamos o motor, ou seja, quando a força contra-eletromotriz pode ser desprezada? Resposta: $26,7 \text{ A}$.

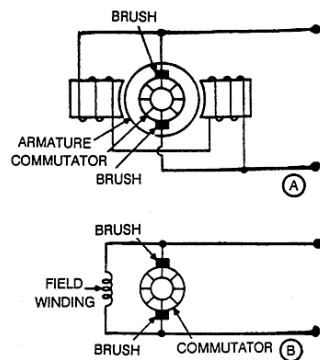


FIGURE 19-6. Shunt Motor Diagram.



Num motor síncrono, usa-se um reostato (resistor variável) ligado em série com o rotor. Caso contrário, como a resistência do estator é tipicamente baixa, a corrente elétrica no motor poderia ser extremamente alta no início, queimando os fios, antes que a força contra-eletromotriz diminuísse naturalmente a corrente.

Problema resolvido: Num motor síncrono, o rotor tem resistência $0,050 \Omega$ e está ligado à rede elétrica com tensão eficaz de 120 V . (a) Qual a corrente no rotor no início (isto é, antes da ação da força contra-eletromotriz)? (b) calcule a resistência do reostato para que a corrente inicial no rotor seja limitada a 60 A ; (c) calcule a força contra-eletromotriz quando a corrente no rotor for igual a 20 A .

Solução: (a) a corrente no rotor enquanto não aparece uma força contra-eletromotriz é dada por

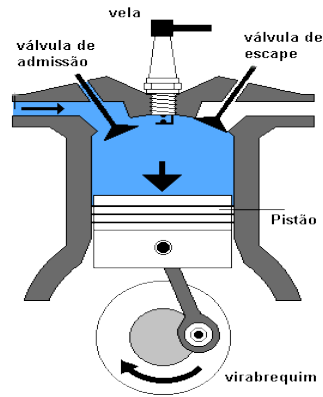
$$i_R = V/r_R = 120/0,050 = 2,4 \text{ kA}$$

(b) como o reostato está ligado em série com o rotor, a resistência equivalente será $0,050 + R$, logo a corrente no rotor será limitada para $i_R = 120/(0,050 + R) = 60 \text{ A}$. Isolando o valor de R temos $R = 2,0 \Omega$.

(c) a força contra-eletromotriz é a tensão de entrada menos a queda de tensão no rotor:

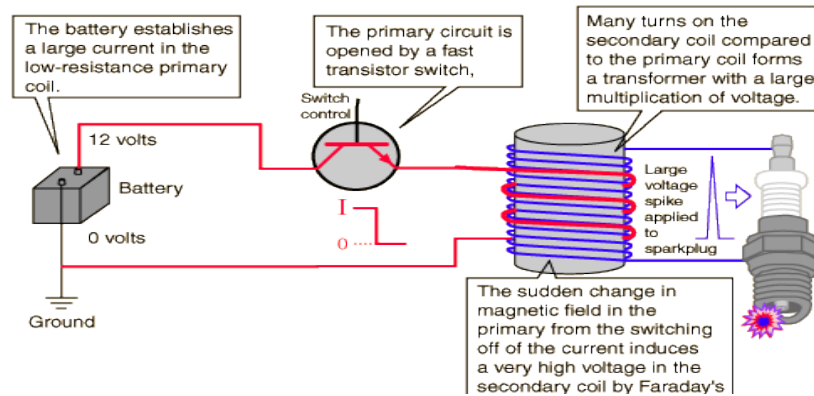
$$\varepsilon' = V - r_R i_R = 120 - 0,050 \times 20 = 119 \text{ V}$$

Problema proposto: Num motor síncrono as resistências do rotor e do estator são, respectivamente, iguais a $0,25 \Omega$ e 150Ω . Ao ser conectado a uma tensão alternada de 120 V (valor eficaz), a força contra-eletromotriz é 115 V . Calcule: (a) a corrente no rotor; (b) a corrente no estator; (c) a corrente total “puxada” pelo motor; (d) a potência consumida pelo motor; (e) as potências dissipadas no estator e no rotor; (f) a potência útil fornecida pelo motor; (g) a eficiência elétrica do motor (=potência consumida/potência fornecida). Respostas: (a) 20 A ; (b) $0,80 \text{ A}$; (c) 21 A ; (d) $2,5 \text{ kW}$; (e) $0,10 \text{ kW}$ e 96 W ; (f) $2,3 \text{ kW}$; (h) 92%



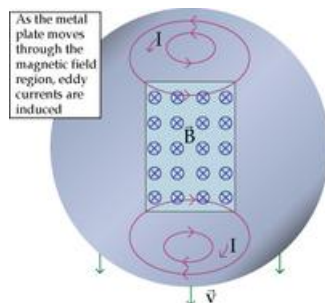
3. Bobina de ignição automotiva: no motor a combustão, a mistura combustível + ar precisa de uma faísca para explodir, forçando o pistão e provocando o movimento do eixo de manivelas. Para produzir essa faísca precisamos de cerca de 40 kV , mas a bateria do carro tem uma fem de apenas 12 V . Logo precisamos usar uma bobina de ignição para gerar essa alta tensão, que tem dois enrolamentos (primário e secundário) que usam o mesmo núcleo. O primário tem poucas voltas e uma baixa resistência, de forma que uma corrente alta é obtida quando ligada à bateria.

Ao contrário do caso anterior, a corrente é contínua, mas é interrompida por um dispositivo e muda rapidamente de um valor alto para zero (um “pulso de tensão”). Isso provoca um campo e um fluxo magnético variável com o tempo e, pela Lei de Faraday, uma fem induzida no secundário. Como o secundário tem muitas voltas, teremos uma tensão elevada também na forma de um pulso, o qual provoca uma faísca (descarga elétrica) na vela.

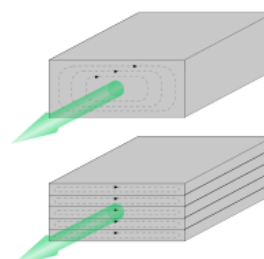


Antigamente o dispositivo interruptor da corrente – chamado “distribuidor”- era acionado mecanicamente. No entanto ocorria uma fem induzida que também causava faíscas no dispositivo. Posteriormente esse faiscamento foi eliminado pelo uso de um capacitor (“condensador”) entre os contactos do distribuidor. Na ignição eletrônica o distribuidor foi substituído por um transistor que atua como chave para interromper a corrente no primário da bobina.

4. **Correntes de Foucault:** se, ao invés de uma espira de fio, houver um fluxo magnético variável numa barra maciça de metal condutor, também haverá correntes internas induzidas, chamadas correntes de fuga ou de Foucault. Devido ao efeito Joule, haverá calor dissipado devido a essas correntes.



Como vimos na aula passada, é necessária uma força externa para movimentar uma espira num campo magnético, devido à força magnética sobre a espira. No caso das correntes de Foucault isso faz com que elas possam ser usadas como uma forma de freio magnético, que é usado, por exemplo, nas bicicletas ergométricas para regular a resistência à pedalada e simular o seu uso em ladeiras. Para diminuir as correntes de Foucault costuma-se laminar ou recortar o bloco maciço de ferro, como se faz nos transformadores.



5. **Microfone dinâmico:** o microfone é um transdutor, que transforma sinais acústicos em sinais elétricos para posterior processamento. As ondas sonoras provocam o movimento de um coletor ligado a uma bobina imersa num campo magnético de um ímã permanente. O movimento dessa bobina leva a um fluxo magnético variável pelas espiras e a uma fem induzida. Essa fem induzida traduz, na forma de um sinal elétrico, as variações e modulações do sinal acústico, permitindo a sua reprodução (após amplificação) num auto-falante, sua gravação, etc.

